

LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

BACHELORARBEIT

Optimierung und Kalibrierung der
„Top-of-Fringe“-Stabilisierung einer Laserdiode
auf einem Methan-Absorptionstrog bei
 6077 cm^{-1} mithilfe eines selbst-referenzierten,
optischen Frequenzkammes

Autor:

Sebastian LEHRACK

Betreuer:

Mathieu QUATREVALET, DLR

Dr. Randolph POHL, MPQ



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft

MAX-PLANCK-INSTITUT
FÜR QUANTENOPTIK
GARCHING



22. Juli 2011

Für die Biene, sumsum.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Grundlagen zu Lidar und Zielsetzung der Arbeit	2
2.1. Grundlagen	2
2.2. Anwendungsbeispiele	4
2.3. Ziel dieser Arbeit	5
3. Messaufbau und Vorüberlegungen	7
3.1. Aufbau	7
3.1.1. Gaszelle	7
3.1.2. Frequenzkamm	7
3.1.3. Messsystem	10
3.2. Umbauten	11
3.2.1. Widerstand für Lasermodulation	11
3.2.2. Modifikation und Erstellung der Software	12
4. Messung und Auswertung	13
4.1. Messungen	13
4.2. Auswertung in IDL	14
5. Ergebnisse	17
5.1. Steigung der Fehlersignalsfunktion	17
5.2. Lage des Nulldurchganges der Fehlersignalsfunktion	18
6. Abschluss	25
A. Weiterführende Überlegungen zur zusätzlichen Befüllung der Gaszelle mit CO₂	26
B. Literatur- und Abbildungsverzeichnis	32

Zusammenfassung

Mithilfe frequenzmodulierter Absorptionsspektroskopie wird Methan bei 6077 cm^{-1} untersucht. Ziel ist es, gute Werte für die Stabilisierung eines Referenzsystems zu ermitteln. Dazu wird einerseits eine Laserdiode hoch- und tieffrequent moduliert und der Laserstrahl durch eine Multipasszelle mit reinem Methan geleitet und das Fehlersignal aufgezeichnet. Andererseits mithilfe eines schnellen Photodetektors das Schwebungssignal dieser modulierten Laserdiode mit einer Referenzdiode gemessen. Zur Stabilisierung der Referenzdiode wird ein optischen, selbstreferenzierten Frequenzkammes verwendet. Es wird die Steigung der Fehlersignalfunktion am Nulldurchgang und unter Verwendung der genauen Stabilisierung der Referenzdiode die Lage des Nulldurchganges für verschiedene Drücke des Methans und verschiedene Werte der hochfrequenten Modulation errechnet. Es zeigt sich für jeden Druck ein anderes deutliches Maximum, jedoch bei keinem Druck ein besonders hoher Wert der Steigung am Nulldurchgang. Die Messung der Lage des Nulldurchganges zeigt ein merkwürdige Sprungverhalten, welches im Rahmen dieser Arbeit nicht abschließend erklärt werden konnte. Weitere Messungen mit Mischungen von Methan und Kohlendioxid in der Gaszelle zur Untersuchung komplexerer Einflüsse der beiden Gase aufeinander werden folgen.

1. Einleitung

Nach Kohlendioxid ist Methan das zweitwichtigste anthropogene Treibhausgas. Während der letzten 650 Tausend Jahre lag die Methankonzentration der Atmosphäre zwischen 400 ppb während der Kaltzeiten und 700 ppb während der Warmzeiten und hat sich in den Jahren 1750 bis 2009 auf ca. 1800 ppb mehr als verdoppelt. Anfangs wurden Messdaten aus in Eis oder Firn eingeschlossenen Gasbläschen gewonnen. Seit Mitte der 80er Jahre werden Methankonzentrationen direkt in der Atmosphäre und global repräsentativ gemessen.

Diese Messungen in den letzten 30 Jahren zeigten eine Erhöhung der Methankonzentration um insgesamt noch einmal 30% gegenüber dem Wert Anfang der 80er Jahre. In den Jahren 2000 - 2005 ist jedoch die jährliche Wachstumsrate der Methankonzentration auf 14 ppb und damit auf nahezu Null zurückgegangen. Dieser Vorgang ist unter Verwendung der bekannten Quellen und Senken nicht hinreichend erklärbar. Es ist also ein Ziel der aktuellen Forschung, mehr über den Kohlenstoffkreislauf in der Atmosphäre im Allgemeinen und das Verhalten von Methan im Speziellen zu erfahren und damit Klimavorhersagen zu verbessern(siehe [2]).

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Möglichkeit, Methankonzentrationen mittels LIDAR-Methoden zu vermessen. Entscheidend für solche Messungen ist die richtige Wahl der Absorptionslinien. Hierbei müssen verschiedene Aspekte berücksichtigt werden, zum Beispiel die Stärke der Absorption, Überschneidungen mit anderen Absorptionslinien und die technische Realisierbarkeit. Ziel dieser Arbeit ist es, die Stabilisierung eines Seedlaser in einem kompakten Messsystem für CH_4 und CO_2 Konzentrationsmessungen in der Atmosphäre zu optimieren.

In meiner Arbeit gebe ich zuerst einen kurzen allgemeinen Einblick in Lidarmethoden. Danach werde ich über meine Messungen und Umbauten im Labor berichten und schließlich eine Auswertung und Zusammenfassung meiner gewonnenen Daten geben.

2. Grundlagen zu Lidar und Zielsetzung der Arbeit

Das Lidar-Messverfahren (**L**ight **D**etecting **A**nd **R**anging, in Anlehnung an Radar, **R**adio **D**etecting **A**nd **R**anging) ist in der Literatur schon länger bekannt (siehe [3] [14] [5]). Dies soll daher nur eine kurze Einleitung und Motivation für meine Messungen sein.

2.1. Grundlagen

Bei einem gepulsten Lidar-System werden Lichtpulse von einem starken Laser in die Atmosphäre ausgesandt. Kleinste Streuungen an Molekülen und Staubteilchen werden von einem Empfangssystem detektiert. Aus der Laufzeit des rückgestreuten Lichtes kann die Entfernung zum streuenden Element errechnet werden. Mit einem solchen System kann beispielsweise die Aerosol-Verteilung in der Atmosphäre bestimmt werden (s. Abb. 1).

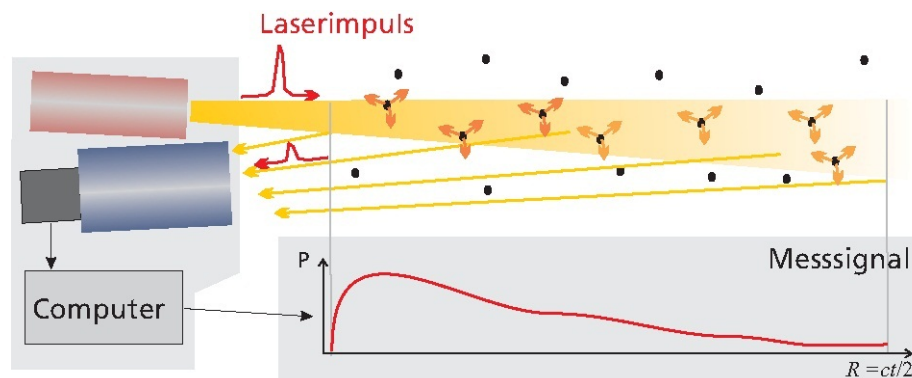


Abbildung 1: Schema des gepulsten LIDAR-Prinzips. Von einem Laser wird ein starker Laserimpuls in die Atmosphäre geschickt. Ein Teleskop nimmt die Rückstreuung an Partikeln auf. Es kann somit die Entfernung zu verschiedenen Schichten der Atmosphäre berechnet werden.
Bild entnommen aus [3].

Für die Messung von Spurengasen wird das DIAL-Verfahren (Differential Absorptions Lidar) verwendet. Hierbei werden zwei Lichtpulse unterschiedlicher Wellenlänge ausgesandt. Bei einer der Wellenlängen absorbiert das zu untersuchende Gas möglichst stark (online), bei der anderen so gut wie gar nicht (offline) (s. Abb. 2).

Aus dem Verhältnis in der Intensität der zurückgestreuten Signale wird das Teilchenzahlprofil des Gases in der Atmosphäre entlang der Messstrecke bestimmt (siehe [14]). Die wohlüberlegte Auswahl dieser Wellenlängen ist dabei entscheidend. Es

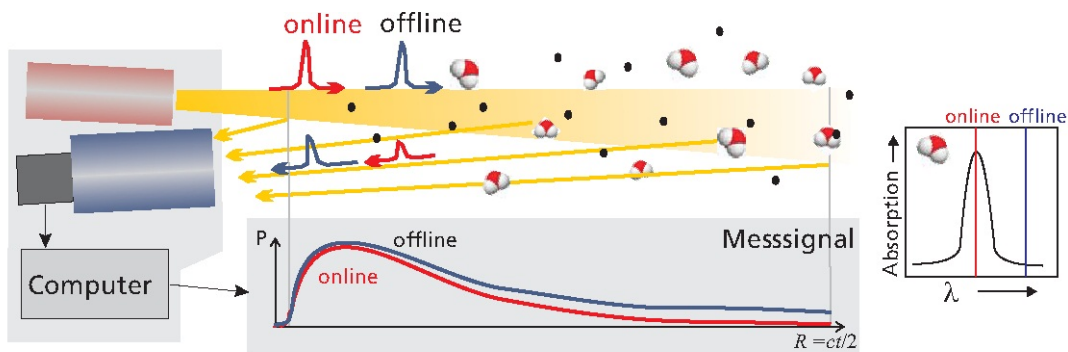


Abbildung 2: Schema des DIAL-Verfahren. Es werden Impulse verschiedener Wellenlängen ausgesendet. Für eine Wellenlänge besitzt das zu untersuchende Gas eine starke Absorption (online), für die andere möglichst gar keine Absorption (offline). Aus dem Verhältnis der gemessenen Intensitäten kann die Konzentration orts aufgelöst berechnet werden.

Bild entnommen aus [3].

werden nicht nur starke Absorptionslinien benötigt, es müssen auch Überschneidungen mit anderen Gasen in der Atmosphäre beachtet werden. So ist zum Beispiel der Einfluss von Wasserdampf oder Kohlendioxid von großer Bedeutung, da diese Gase häufig und in größeren Mengen in der Atmosphäre auftreten und somit die

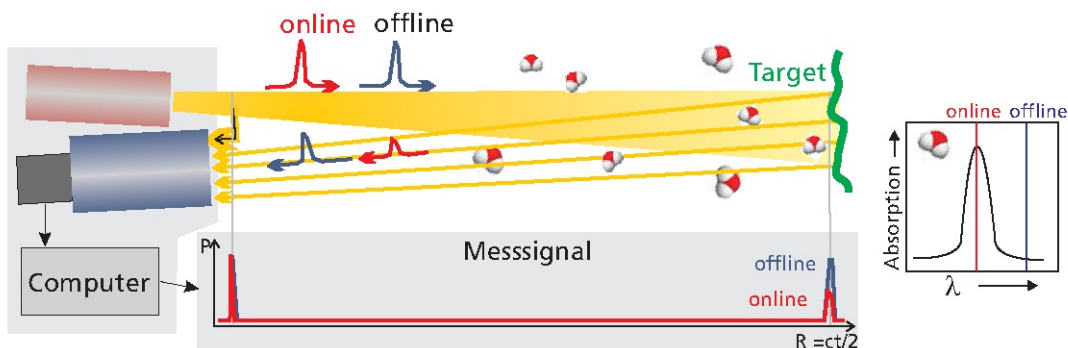


Abbildung 3: Schema des IPDA-Verfahrens. Die grundlegende Vorgehensweise gleicht der DIAL-Methode, jedoch wird nicht die Streuung der Partikel aufgenommen, sondern die starke Rückstreuung von einem massiven Objekt, dem „Hard-Target“, zum Beispiel dem Erdboden oder dichteren Wolken. Das Verfahren bietet ein besseres SNR als das DIAL-Verfahren wenn die atmosphärische Rückstreuung gering ist. Jedoch kann nur noch der gesamte Säulengehalt gemessen werden und keine orts aufgelöste Konzentration.

Bild entnommen aus [3].

Intensitätsmessung beeinflussen. Es müssen Linienpaare gewählt werden, bei denen diese Quereinflüsse möglichst gering sind.

Eine spezielle Art eines DIAL ist IPDA (Integrated Path Differential Absorption), auch als „Hard-Target-Lidar“ bezeichnet (s. Abb. 3). Hierbei wird nicht die atmosphärische Streuung der Teilchen gemessen, sondern die Rückstreuung von einem „Hard-Target“. Dafür können prinzipiell alle dichteren Objekte dienen, zum Beispiel Gebäude, die Erdoberfläche, Wasser oder dichte Wolken. Bei diesem Verfahren entfällt allerdings die Ortsauflösung innerhalb der Messstrecke, und nur der gesamte Säulengehalt, also das komplette Volumen, das vom Laser erfasst wird, kann gemessen werden. Zusätzlich muss die Entfernung zum Target genauestens bekannt sein. Der Vorteil dieses Messverfahrens ist die deutlich höhere Signalstärke, wenn die atmosphärische Rückstreuung gering ist. Dadurch sind Messungen mit höherer Genauigkeit möglich.

2.2. Anwendungsbeispiele

Ein Beispiel zur Anwendung eines solchen Lidar-Systems ist CHARM-F (CO₂ and CH₄ Atmospheric Remote Monitoring - Flugzeug) (siehe [13]) oder MERLIN (Methane Remote Sensing Lidar Mission) (siehe [1]).

DIAL-Messverfahren und dafür geeignete Absorptionslinien sind bereits länger bekannt (siehe [4]) und es gibt verschiedene Anwendungsgebiete, die eine möglichst genaue Methankonzentrationsmessung erfordern.

- Natürliche Ölfelder dampfen Methan an der Oberfläche aus. Eine Möglichkeit zur Detektion eines unbekannten Ölfeldes ist also die Messung erhöhter Methankonzentration über dem Boden (siehe [12]).
- Eine weitere Anwendung ist die Detektion von Lecks an Gaspipelines (siehe [6]). Normalerweise müssen zur Überprüfung von Erdgasleitungen diese zu Fuß mit Messgeräten abgegangen werden. Mithilfe des CHARM Systems für Hubschrauber können solche Überprüfungen mit bis zu 90km/h erledigt werden.
- Methan ist ein sehr wirksames Klimagas. Genau wie CO₂ besitzt es Absorptionslinien im IR-Bereich und ist somit in der Lage, von der Erdoberfläche zurückgestrahlte Leistung in Form von Wärme in der Atmosphäre zu halten. Im Gegensatz zu CO₂ reagiert Methan in höheren Schichten der Atmosphäre mit Sauerstoff zu CO₂ und H₂O mit einer Halbwertszeit von ca. 14 Jahren und hat somit ein fast 4-mal größeres Treibhauspotential als CO₂ (siehe [9] [11]).

Obwohl Methan zusammen mit CO_2 den größten Beitrag zum Treibhauseffekt leistet (siehe [11]), ist über das Verhalten des natürlichen Kohlenstoff-Kreislaufs wenig bekannt. Dieses Unwissen erschwert Voraussagen zu Klimaveränderungen und ist somit zurecht Gegenstand aktueller Forschung.

2.3. Ziel dieser Arbeit

Bisherige DIAL-Verfahren für Methan haben Absorptionslinien im Bereich von 3000 cm^{-1} verwendet. Dank theoretischer Arbeit am DLR ist die Existenz eines Linienmultipletts bei 6077 cm^{-1} mit nominaler Wellenlänge und geeigneten Eigen-

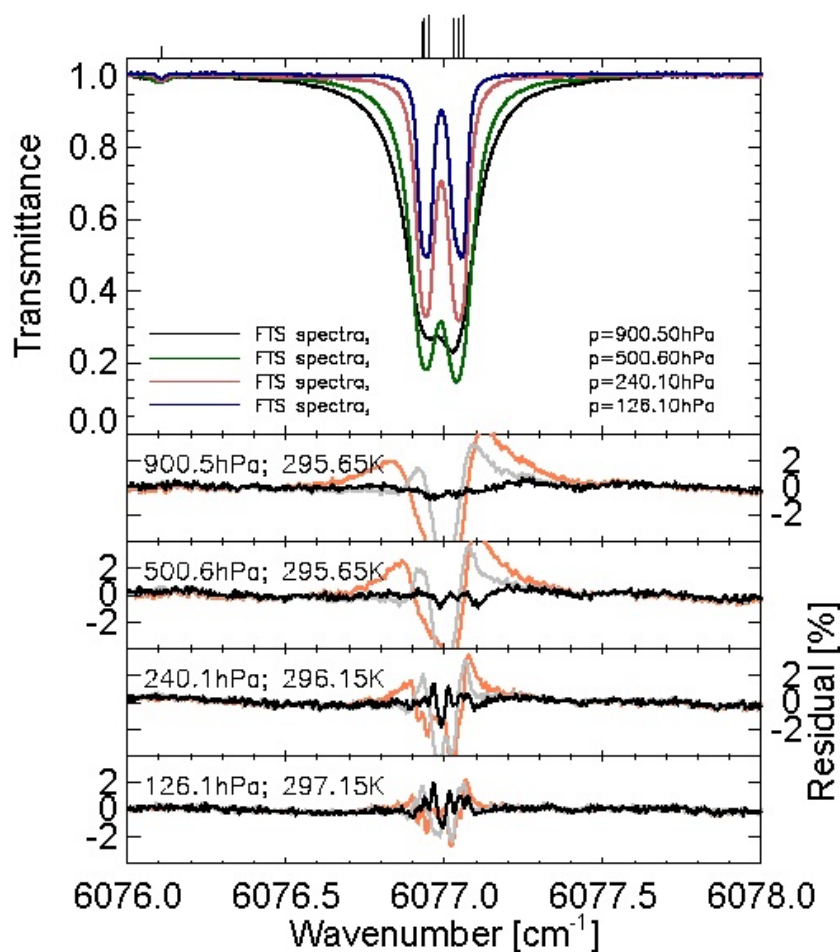


Abbildung 4: Methanspektrum im Bereich des R6-Multipletts von 6077 cm^{-1} für verschiedene Drücke. Es ist zu erkennen, dass der Trog nicht symmetrisch ist. Diese Beobachtung deckt sich mit den Messungen (siehe Kapitel 4).

schaften für IPDA-Messungen bekannt (siehe [8] [7] und Abb. 4). Es bietet sich hier im Absorptionstrog eine geeignete Online-Wellenlänge an.

Ziel dieser Bachelorarbeit ist die Untersuchung dieses Absorptionstrog mithilfe eines selbstreferenzierten, optischen Frequenzkammes. Dieser Absorptionstrog soll nicht nur für Messungen in der Atmosphäre verwendet werden, sondern auch lokal in einer Multipasszelle als Referenz für die Stabilisierung der Onlinewellenlänge der Messpulse. Diese Pulse werden durch eine injection-seeded optische parametrische Oszillator Architektur erzeugt, wobei ein Seedlaser die Wellenlänge der im Resonator des Oszillators erzeugten Pulse imponiert. Für eine bestmögliche Stabilisierung dieses Seedlasers auf diesem Absorptionstrog wird das 1f-Fehlersignal erzeugt und diese Laserdiode wird auf den Nulldurchgang der 1f-Fehlersignalfunktion stabilisiert. Betrachtet wird in dieser Arbeit die Steigung der 1f-Fehlersignalfunktion bezüglich des Partialdruckes von Methan und der hochfrequenten Modulation des Lasers (siehe Abschnitt 5).

3. Messaufbau und Vorüberlegungen

Bevor die eigentlichen Messungen beginnen konnten, waren einige Überlegungen und Veränderungen an dem Aufbau im Labor notwendig.

3.1. Aufbau

3.1.1. Gaszelle

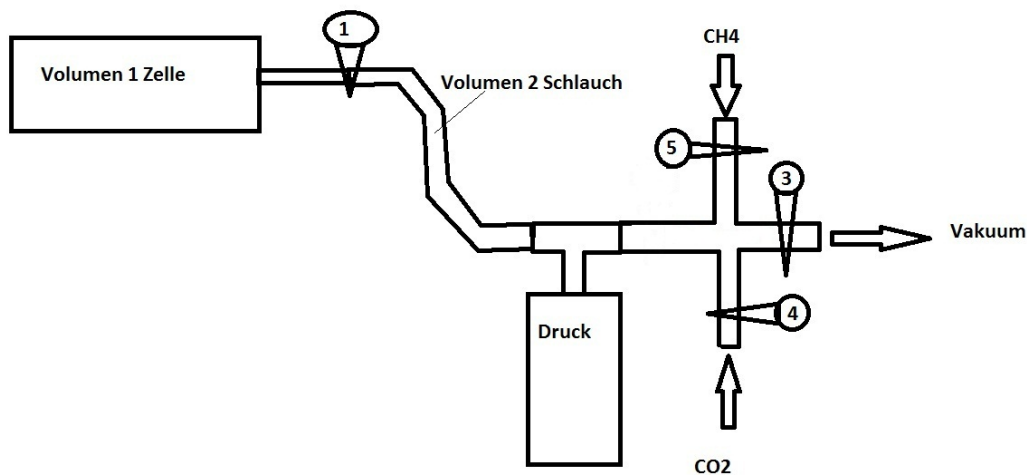


Abbildung 5: Schematische Überblick über die Gaszelle und ihre Anschlüsse mit Ventilen, Drucksensor, Gaszufuhr und Anschluss zur Vakuumpumpe.

Ein wesentlicher Bestandteil des Experiments ist die Multipass-Zelle. Abbildung 5 zeigt den aktuellen Aufbau. Diese Arbeit beschäftigt sich nur mit reinem Methan, sodass der Zulauf mit CO_2 nicht verwendet wurde. Es wird aber ein kompaktes System für gleichzeitige Messungen von CO_2 und CH_4 entwickelt, bei dem mehrere Seedlaser sowohl auf CO_2 – als auch auf CH_4 –Absorptionslinien stabilisiert werden. Es wurden daher Überlegungen angestellt, wie die Befüllung und Messung mit den beiden Gasen aussehen könnte (Siehe Anhang A).

3.1.2. Frequenzkamm

Ein weiterer Teil des Experiments ist ein optischer, selbstreferenzierter Frequenzkamm von MenloSystems. Dieser wird verwendet, um eine der beiden Laserdioden

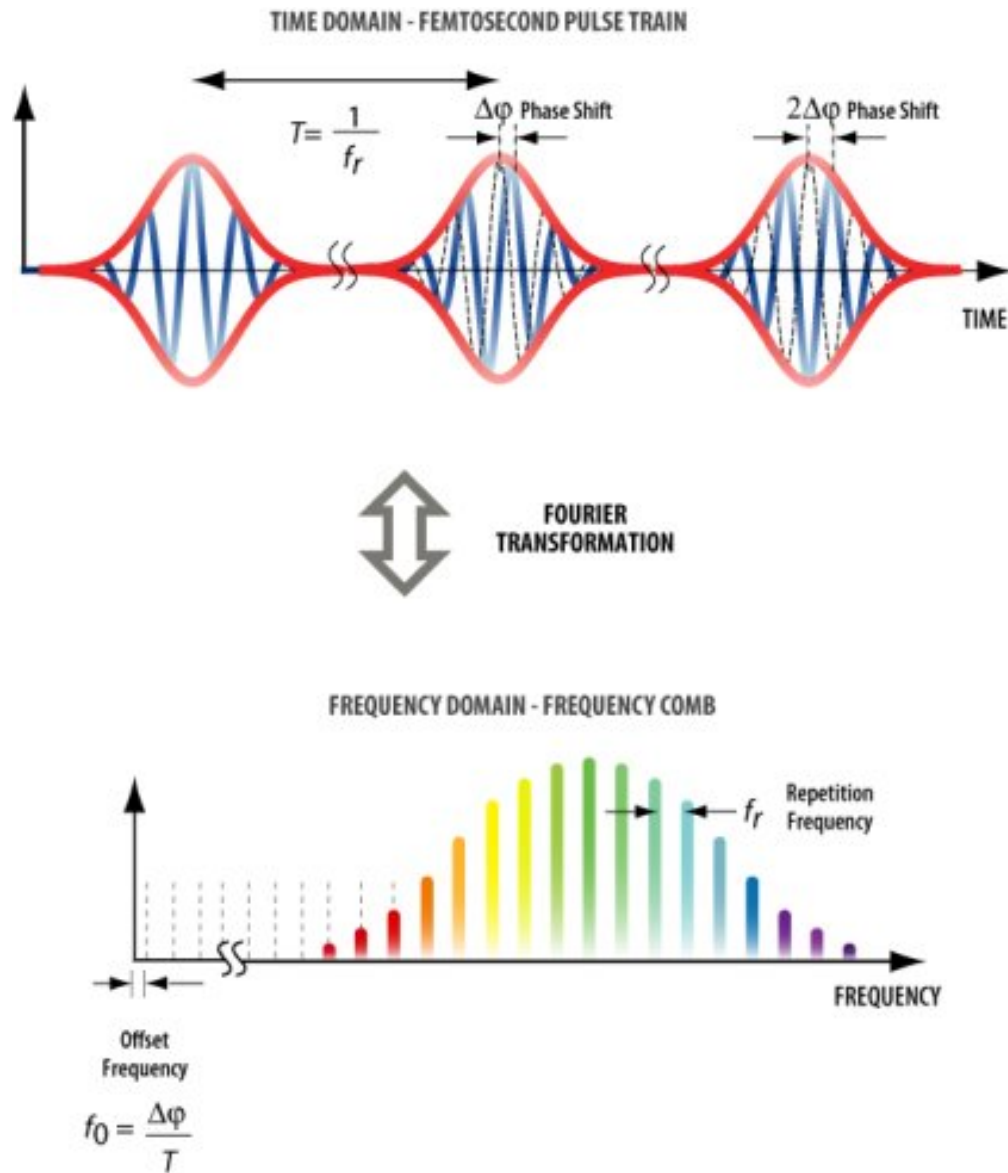


Abbildung 6: Oben: Aufeinanderfolgende Pulse aus einer Pulssequenz, die durch einen moden-gelockten Laser ausgegeben werden und das dazugehörige Spektrum. Da die Trägerwelle der Frequenz f_c sich mit ihrer Phasengeschwindigkeit ausbreitet und die Einhüllende mit einer davon abweichenden Gruppengeschwindigkeit, wird die Trägerwelle um $\Delta\phi$ nach jedem Umlauf gegenüber der Einhüllenden der Pulse verschoben.

Unten: Diese kontinuierliche Verschiebung erzeugt den Frequenz-Offset $f_0 = \frac{\Delta\phi}{T}$ des Frequenzkammes.

Bild entnommen aus [10].

auf wenige kHz zu stabilisieren. Referenz ist das 20-MHz-Signal von einem GPS-Empfänger.

Ein gepulster Femtosekunden-Laser erzeugt Sequenzen von Laserpulsen, die im wesentlichen Kopien von ein und demselben Puls sind. Diese Pulse zirkulieren in einem Resonator der Länge L mit einer Trägerfrequenz f_c und haben einen zeitlichen Abstand, die Umlaufzeit $T = \frac{2L}{v_g}$, wobei v_g die durchschnittliche Gruppengeschwindigkeit im Resonators ist. Die erzeugten Pulse sind jedoch nicht absolut identisch. Der Grund dafür ist, dass die Einhüllende der Pulse $A(t)$ sich mit der Geschwindigkeit v_g ausbreitet während die Trägerwelle sich mit ihrer Phasengeschwindigkeit fortbewegt. Das Ergebnis ist eine Phasenverschiebung, wie sie in Abbildung 6 dargestellt ist. Anders als die Einhüllende, welche uns eine strenge Definition der Pulswiederholungszeit $T = f_r^{-1}$ gibt, indem wir fordern, dass $A(t) = A(t-T)$, ist das elektrische Feld im Allgemeinen nicht periodisch in der Zeit. Wenn die Periodizität der Einhüllenden angenommen wird, kann das elektrische

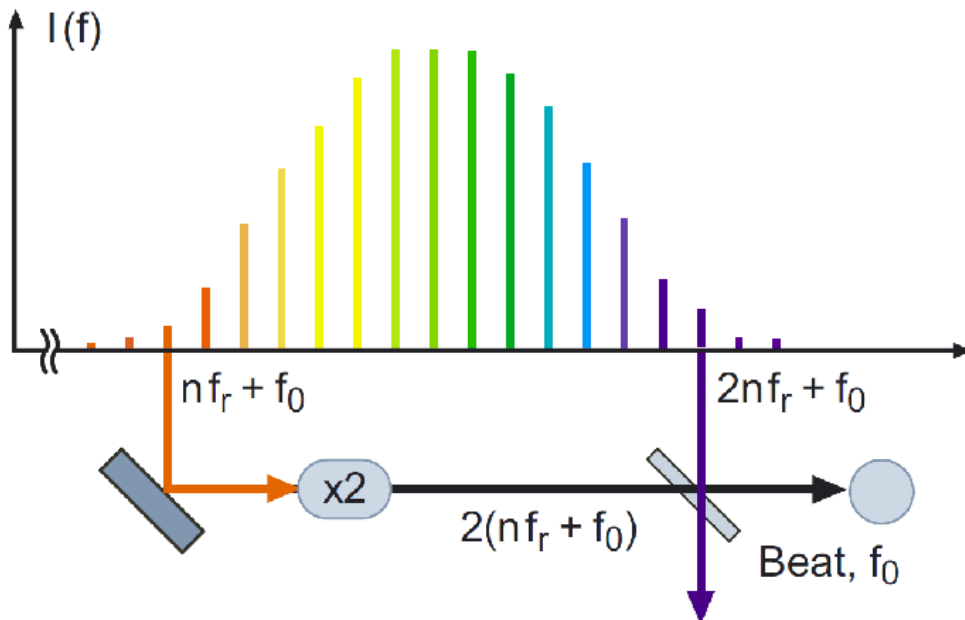


Abbildung 7: Das Prinzip eines optischen Frequenzgenerators. Eine Mode mit der Modennummer n im roten Teil des Kammes, dessen Frequenz durch Gleichung 2 gegeben ist, wird mithilfe eines nichtlinearen Kristalls frequenzverdoppelt. Wenn der Frequenzkamm eine komplette optische Oktave abdeckt, dann gibt es eine dazu passende Mode mit der Modennummer $2n$. Die Schwebung dieser beiden Frequenzen ist dann $2(n f_r + f_0) - (2n f_r + f_0) = f_0$ und damit der gesuchte Frequenzoffset. Bild entnommen aus [10].

Feld außerhalb des Resonators als Fourier-Reihenentwicklung geschrieben werden

$$E(t) = \operatorname{Re} \left(A(t) \cdot e^{i f_c t} \right) = \operatorname{Re} \left(\sum_n A_n \cdot e^{-i(f_c + n f_r)t} \right), \quad (1)$$

wobei A_n die Fourierkomponenten von $A(t)$ sind.

Die Gleichung 1 zeigt, dass unter der Annahme einer periodischen Einhüllenden das resultierende Fourierspektrum ein Kamm von Lasermode ist. Der Abstand dieser Moden zueinander ist die Pulswiederholungsfrequenz oder Repetitionsrate f_r . Da f_c nicht zwangsläufig ein ganzzahliges Vielfaches von f_r ist, sind die Moden um einen Frequenzoffset verschoben gegenüber einem möglichen harmonischen Spektrum der Pulswiederholungsfrequenz. Dieser Offset kann durch eine einfache Ummummerierung so gewählt werden, dass $f_0 < f_r$ ist:

$$f_n = n \cdot f_r + f_0, \quad (2)$$

wobei n eine große natürliche Zahl ist ($\approx 10^6$).

Die Gleichung 2 verknüpft die zwei Frequenzen f_r und f_0 mit der optischen Frequenz f_n im typischen THz-Bereich. Die Pulswiederholungsfrequenz f_r ist über die Länge des Laserresonators bestimmt und variiert zwischen wenigen 10 MHz bis zu einigen GHz. Der Frequenzoffset f_0 ist nicht so leicht zu bestimmen, solange der Frequenzkamm nicht mehr als eine optische Oktave enthält. Abbildung 7 zeigt, wie mithilfe einer optischen Frequenzverdoppelung der Frequenzoffset bestimmt werden kann. Dazu wird eine Mode aus dem roten Spektralbereich des Kammes mit der Modennummer n unter Verwendung eines nichtlinearen Kristalls frequenzverdoppelt. Nach Gleichung 2 ist dann die Frequenz $2(n f_r + f_0)$. Wenn das Spektrum des Kammes mehr als eine optische Oktave enthält, gibt es eine Mode mit der Modennummer $2n$ im blauen Spektralbereich mit der Frequenz $2n f_r + f_0$. Die Schwebung dieser beiden Frequenzen ist der gesuchte Frequenzoffset.

3.1.3. Messsystem

Das Messsystem besteht neben den oben genannten Elementen aus 2 Laserdioden, einer Referenzdiode und einer Messdiode. Beide Dioden werden zuerst grob auf den Absorptionstrog durch die Temperaturregelung (i.e. dem Peltierelement der Dioden) stabilisiert. Die Referenzdiode wird mithilfe des Frequenzkamms auf 182,1846 THz stabilisiert. Die Messdiode wird mit einer Erfassungskarte durch den PC mit 100 Hz hochfrequent moduliert und unter Verwendung eines Funktionsgenerators mit 1 Hz tieffrequent moduliert. Mit diesem Funktionsgenerator kann auch ein Offset auf das Modulationssignal gelegt werden und somit die Frequenz der

Messdiode einfach verschoben werden. Die genauere Positionierung der Dioden erfolgt über den Strom an diesen.

Das Licht von der Messdiode wird geteilt. Ein Teil wird mit der Referenzdiode überlagert. Die entstehende Schwebung wird durch einen schnellen Photodetektor aufgenommen. Der andere Teil des geteilten Signals der Messdiode geht durch eine Gaszelle mit 36 m Weglänge und anschließend in einen Lock-In-Verstärker. Dieser erzeugt das 1f-Fehlersignal, welches gleichzeitig mit dem von einem Frequenzzähler gemessene Frequenz der Schwebungsfrequenz am PC aufgezeichnet wird. Dabei werden die Messdaten so synchronisiert, dass der Frequenzzähler die durchschnittliche Schwebungsfrequenz zwischen der Lasern misst, obwohl die Schwebungsfrequenz aufgrund der Modulation der Messdiode moduliert ist.

Theoretisch ist es möglich, den Drucksensor über eine RS232-Schnittstelle auszu-lesen. Praktisch traten hierbei aber Probleme auf, welche nicht in dem zeitlichen Rahmen dieser Arbeit gelöst werden konnten. Der Druck musste daher zu jeder Messung notiert werden. Das von mir in IDL verfasste Auswertungsprogramm ist in der Lage, mithilfe von dafür angelegten Tabellen Einzelmessungen bei der Auswertung mit dem dazugehörigen Druck und hochfrequenter Modulation in eine Datenbank einzuordnen.

3.2. Umbauten

3.2.1. Widerstand für Lasermodulation

Die hochfrequente Modulation wird mit der tieffrequenten Modulation über einen Bias Tee gekoppelt, bevor das Signal als Modulation zur Messdiode geht. Zwischen dem Bias Tee und der Laserdiode befindet sich ein Widerstand, um die Stärke des Signals zu kontrollieren. Der Einfluss einer Modulation von zum Beispiel 1 Volt auf die Laserdiode ist a priori nicht feststellbar und muss mit einem einfachen Testlauf gemessen werden. Die Erfassungskarte, die die hochfrequente Modulation erzeugt, hat eine Genauigkeit von 16 Bit und einen maximalen Spannungsausgang von 10 Volt. Es ist das Ziel, dass die 16 Bit und die 10 Volt der Erfassungskarte für die Modulation voll ausgenutzt werden können und gleichzeitig die Messdiode in einem für das Experiment interessanten Bereich moduliert wird. Hinzu kommt, dass der Frequenzzähler hinter dem schnellen Photodetektor in einem Frequenzbereich zwischen 100 und 2000 MHz die Schwebungsfrequenzen zählen kann. Bei einer grundlegenden Messung des Systems wurde dank einem speziellen Modus des Frequenzzählers mit hoher Zeitauflösung festgestellt, dass 1 Volt hochfrequenter Modulation ca. 1 GHz Modulation Spitze zu Spitze in der Frequenz der Messdiode bedeuten. Der Widerstand zwischen Bias Tee und Laserdiode wurde daraufhin um das 4-fache erhöht, von 1 k Ω auf 4 k Ω . Eine weitere Messung ergab, dass eine Modulation von 1 V nun 257 MHz Modulation Spitze zu Spitze in der Frequenz

der Messdiode entsprechen. Im Folgenden wird diese HF-Modulation immer als Frequenzmodulation Spitze zu Spitze der Messdiode angegeben.

3.2.2. Modifikation und Erstellung der Software

Der Großteil der Software, die zur Steuerung der Laserdioden nötig ist, wurde mir bereits gestellt. Ein Programm zur Temperaturregelung und Stabilisierung der Laserdioden habe ich von Mathieu Quatrevalet übernommen. Ein weiteres Programm zur Erstellung der hochfrequenten Modulation über die Erfassungskarte habe ich erweitert. Es ist nun zusätzlich in der Lage, die Länge von Messzyklen sowie die Anzahl der Wiederholungen dieser zu bestimmen und um wieviel die hochfrequente Modulation bei jedem Schritt erhöht werden soll. Es war somit nicht mehr nötig, die Messungen jederzeit zu überwachen, sondern es reichte aus, in regelmäßigen Abständen den Druck abzulesen und in einer Protokollliste zu notieren. Diese Listen wurden anschließend für die Auswertungssoftware übertragen. Details zur Auswertung siehe Abschnitt 4.

4. Messung und Auswertung

4.1. Messungen

Alle Messungen wurden über eine Dauer von 5 Minuten und mit einer tieffrequenten Modulation mit der Frequenz 1 Hz und einer Amplitude von 400 mV durchgeführt. Diese Werte haben sich im Laufe der Messungen als geeignet erwiesen. Die Amplitude war nicht so stark, dass die Messung über den Bereich linearer Steigung des Absorptionstrokes hinausging (siehe Abb. 8), jedoch war auch für

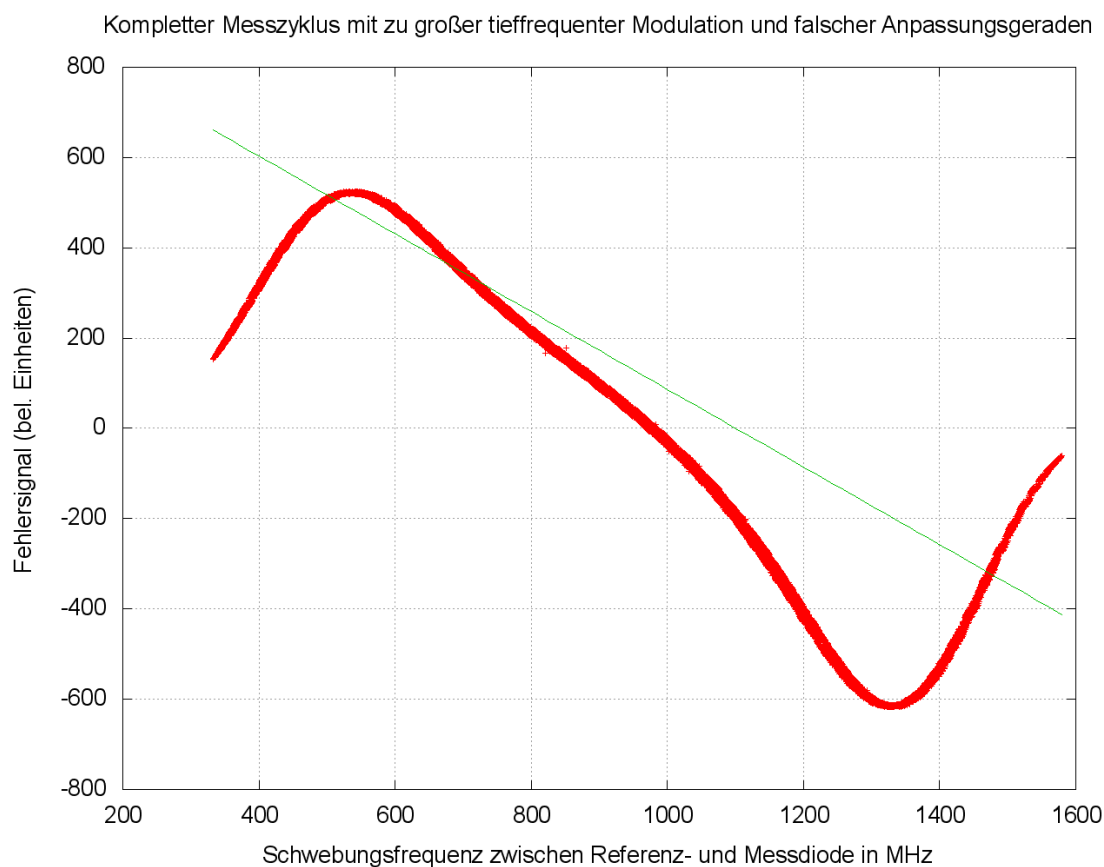


Abbildung 8: Beispiel für zu starke tieffrequente Modulation der Messdiode. Die Spitzen der Oszillation flachen ab, da die Modulation bereits in einem Bereich nicht-linearer Steigung ist bzw. bedeuten die Extrema in dieser Kurve, dass die Absorptionskurve an dieser Stelle einen Wendepunkt besitzt. Es ist auch zu erkennen, dass sich die Kurve unterhalb der x-Achse anders verhält als oberhalb. Dies ist ein Hinweis auf die Asymmetrie, die sich auch in Abbildung 4 zeigt.

kleine Amplituden des Fehlersignals diese Modulation stark genug und die Messzeit lang genug, so dass Drifts der Messdiode innerhalb eines Messzyklusses zu vernachlässigen sind.

Abbildung 8 zeigt auch, dass der Absorptionstrog nicht symmetrisch ist, wie bereits in Abb. 4 zu sehen.

4.2. Auswertung in IDL

In den Abbildungen 9 und 10 ist zu erkennen, dass aus Timinggründen die Messwerte immer leicht zeitversetzt aufgenommen werden. In der Theorie sollte das gemessene Fehlersignal gegen die Schwebungsfrequenz aufgetragen eine Gerade ergeben, in diesem Fall mit Nulldurchgang, da die Messungen am Hochpunkt in der Mitte des Absorptionstrokes durchgeführt wurden. Die Ellipsenform in den Abbildungen ist eine Lissajous-Figur, die durch die Phasendifferenz zwischen den Signalen entsteht. Für eine korrekte Anpassung an die Daten muss diese Phasendifferenz minimiert werden. Dazu wurden die Daten interpoliert und gegeneinander verschoben, bis der Punkt mit den besten Fitting-Ergebnissen erreicht war. In diesem Fall wurden die Daten mit der Anpassung gewählt, die den geringsten Fehler in der Y-Abweichung der Messpunkte von der berechneten, angepassten Kurve besitzen. Die Software zur Auswertung der Daten wurde von mir in IDL 5.6 verfasst. Jeder Messzyklus enthält 25000 Datenpunkte, sowohl den Wert des Fehlersignals der Messdiode, als auch die Schwebungsfrequenz zwischen Mess- und Referenzdiode. Nachdem das Programm den Druck und die HF-Modulation der Messung aus der Tabelle gelesen hat, werden diese 25000 Datenpunkte zu Einzelmessungen à 100 Punkten zerlegt. Damit enthält jede Einzelmessung genau eine komplette Periode der tieffrequenten Modulation. Die Anpassungsrechnung wurde an ein Polynom 3. Grades durchgeführt, um Fehler in der Berechnung der Steigung zu vermeiden, wie sie sich in Abbildung 8 zeigen. Bei einer zu starken Amplitude der tieffrequenten Modulation zeigt die Kurve an ihren Rändern kein lineares Verhalten mehr aufgrund der Nähe zu den Tiefpunkten des Troges. Abbildung 8 ist dafür ein Extrembeispiel, bei dem sogar über die Wendepunkte der Absorptionskurve hinaus moduliert wurde.

Von allen Fits wurden die Nullstelle und die Steigung an der Nullstelle berechnet. Der Mittelwert und die Standardabweichung aller Nulldurchgänge und Steigungen wurden in eine Datenbank übertragen. Mit dieser Datenbank können nun Plots aller Art angefertigt werden (Siehe Abschnitt 5).

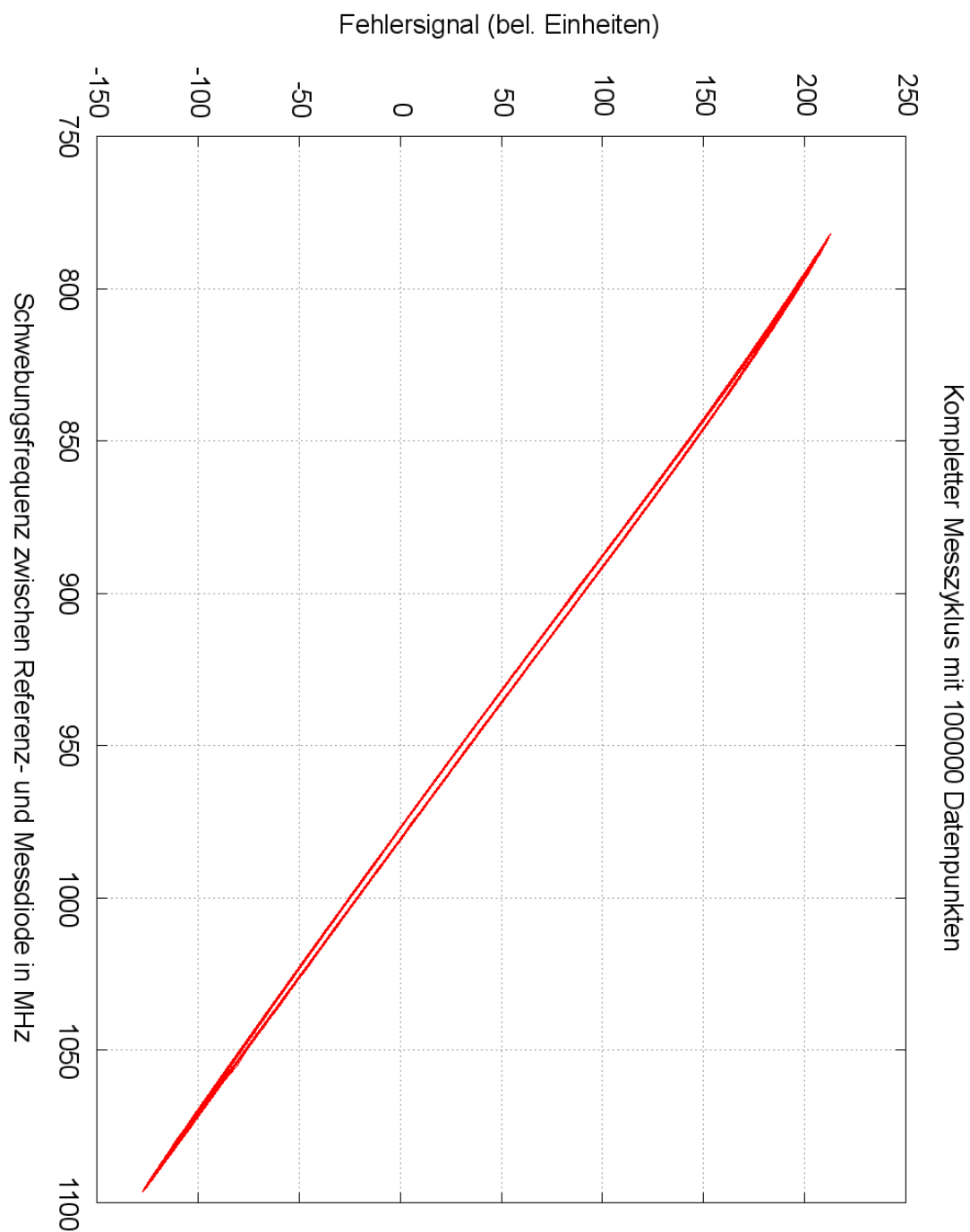


Abbildung 9: *Kompletter Messzyklus mit allen Datenpunkten. Es ist das gemessene Fehlersignal gegen die Schwebungsfrequenz zwischen Messdiode und Referenzdiode aufgetragen. Man erkennt die Phasenverschiebung und das leichte Abflachen der Geraden im oberen Bereich. Bei dieser Messung wurde also bereits zu stark tieffrequent moduliert.*

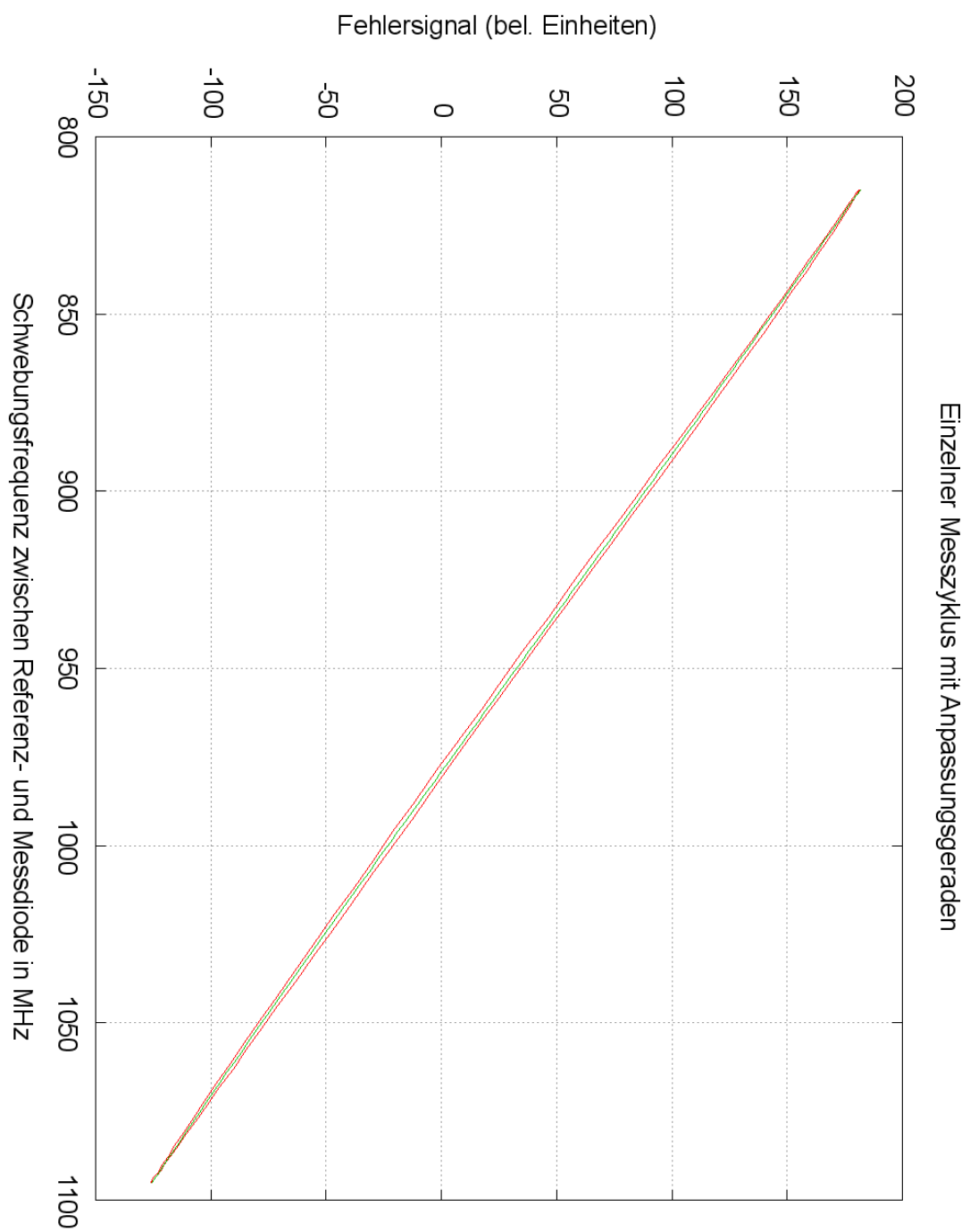


Abbildung 10: Extrahierte Einzelmessung aus Abb. 9 mit guter Anpassung. Die Phasenkorrektur ist in dieser Abbildung nicht enthalten.

5. Ergebnisse

Ziel der Messungen war es, gute Werte für eine Stabilisierung eines Referenzsystems zu erhalten, d.h. optimale Kombinationen aus dem Druck in der Gaszelle und der Amplitude der HF-Modulation. Im vorliegenden Fall ist eine „Top-of-Fringe“ Stabilisierung geplant, d.h. der Laser soll im Maximum der Absorption bzw. Minimum der Transmission stabilisiert werden. Dazu wird mithilfe einer Frequenzmodulation des zu stabilisierenden Lasers ein Fehlersignal erzeugt, welches der 1. bzw. n-ten Ableitung der Absorptionskurve entspricht. Im Maximum der Absorption hat dieses Fehlersignal einen Nulldurchgang. Je steiler die Fehlersignalfunktion am Nulldurchgang ist, desto leichter sind Abweichungen von dieser Ideallage zu detektieren und nachzujustieren.

5.1. Steigung der Fehlersignalfunktion

Ausgangslage der Messungen war die Simulation, die in Abbildung 11 zu sehen ist. Hier ist die Steigung am Nulldurchgang als Funktion des Druckes von reinem Methan in der Gaszelle und der HF-Modulation dargestellt. Es ist ein deutliches Maximum im Bereich von 2 hPa bis 5 hPa und 1 GHz bis 1,4 GHz Modulation der Messdiode zu erkennen. Diese Simulation wurde anhand der Linienparametern in der spektroskopischen Datenbank HITRAN erstellt. Ziel der Messungen ist eine Überprüfung dieser Simulation und der Unsicherheiten in den Parametern aus der Datenbank. Abbildung 12 ist ein Ausschnitt aus Abbildung 11 für den gemessenen Bereich von 1 bis 5 hPa und bis zu 1500 MHz HF-Modulation. Abbildung 13 zeigt die tatsächlichen Messungen für diesen Bereich. Für eine bessere Vergleichbarkeit wurde die selbe Darstellung wie für die Simulation gewählt. Dafür mussten fehlende Werte mithilfe einer Anpassung der Messpunkte an eine Gaußkurve berechnet werden. Eine Darstellung der tatsächlichen Datenpunkte findet sich in Abbildung 14. Bei einem Vergleich der beiden Abbildungen 12 und 13 ist bei beiden ein deutliches Maximum im Bereich höherer Modulation mit starkem Abfall zu beiden Seiten hin zu erkennen. Die Lage des Maximum ist in der Messung um ungefähr 300 MHz in der HF-Modulation gegenüber der Simulation verschoben. Es lässt sich auch das Maximum für den Bereich um 3,5 hPa in den Messungen nicht erkennen, es deutet sich eher für höhere Drücke an. Für den Bereich, in dem die Messungen ausgeführt wurden, findet sich somit kein Druck, bei dem es ein besonders hohes Maximum in der Steigung gibt. Es zeigt sich aber, dass das Maximum für verschiedene Drücke für jeweils verschiedene Werte der HF-Modulation auftritt.

Die Werte für den Bereich über 1,6 GHz HF-Modulation liegen im Grenzbereich des Frequenzzählers. Es können hier Fehler in der Datenerfassung auftreten, dadurch dass die Messdiode so stark moduliert wird, dass ihre Frequenz in die Nähe der Referenzfrequenz kommt und somit die Schwebungsfrequenz Null wird. Die Werte

in diesem Modulationsbereich sind daher mit einem wesentlich höheren Fehler zu betrachten und sollten nur als Tendenz verstanden werden.

5.2. Lage des Nulldurchganges der Fehlersignalfunktion

Abbildung 15 zeigt die Lage der Nulldurchgänge für die selben Messungen wie in Abbildung 14. Die Lage ist hier als Funktion der Schwebungsfrequenz zwischen Mess- und Referenzdiode dargestellt. Für eine genaue Berechnung fehlt die Lage der Referenzdiode.

Diese ist auf folgende Werte des Frequenzkammes stabilisiert:

- Die Messung mit einem Wavemeter im Frequenzkamm ergibt für die Referenzdiode 182,18458 THz.
- Der Frequenzoffset von 20 MHz ist nach links stabilisiert. Er muss daher von der errechneten Frequenz abgezogen werden.
- Die Referenzdiode ist im Abstand von 21,4 MHz zur linken Seite einer Kammmode stabilisiert und muss ebenfalls abgezogen werden.
- Der Synthesizer für die Abstände der Kammmoden ist auf 20,016 928 701 MHz eingestellt.

Die genaue Frequenz errechnet sich wie folgt:

- Die Repetitionsrate und damit der Abstand der einzelnen Kammmoden ist:

$$245 \text{ MHz} + \frac{f_{syn}}{4} = f_r, \quad (3)$$

wobei f_{syn} die Frequenz des Synthesizers ist (siehe [10]). Somit ergibt sich in diesem Fall eine Repetitionsrate f_r von 250,004 232 MHz

- Mithilfe der gemessenen Frequenz vom Wavemeter wird die Modennummer abgeschätzt. Diese errechnet sich in unserem Fall mit einer angepassten Gleichung 2 (siehe [10]):

$$f_n = - \text{Offset Kamm} - \text{Abstand Kammmode zu Laser} + n f_r. \quad (4)$$

Hierbei wurde bei den Vorzeichen bereits berücksichtigt, auf welche Seite jeweils stabilisiert wurde. Wird diese Gleichung nach der Modennummer n umgestellt und für f_n vorläufig die Frequenz vom Wavemeter verwendet, so errechnet sich eine Modennummer von 728726,149. Die Modennummer muss allerdings eine natürliche Zahl sein, deshalb wird n auf 728726 abgerundet und

dies als die Kammmode verwendet, auf welche die Referenzdiode stabilisiert wurde.

- Wieder mithilfe von Gleichung 4 und der eben errechneten Modennummer n ergibt sich eine exakte Frequenz $f_n = 182\,184\,542,696$ MHz.

Auch in Abbildung 15 dürfen die Werte im Bereich über 1600 MHz HF-Modulation nur als Tendenz verstanden werden. Der Einschnitt im Bereich von 1200 MHz HF-Modulation ist vermutlich ein technisches Problem, möglicherweise im Algorithmus der Auswertung oder der Datenerfassung. Dies konnte aber im Rahmen dieser Arbeit nicht geklärt werden, sodass weitere Untersuchungen in diesem Bereich notwendig sind. Abgesehen von diesem Einschnitt zeigen die Werte für die Lage des Nulldurchganges die richtige Tendenz. Die von der Auswertungssoftware errechnete Standardabweichung bezüglich der Nulllage liegt bis auf wenige Ausnahmen im 100-kHz-Bereich. Ein Zusammenhang zwischen dieser Standardabweichung und dem Druck oder der Amplitude der HF-Modulation ist nicht zu erkennen.

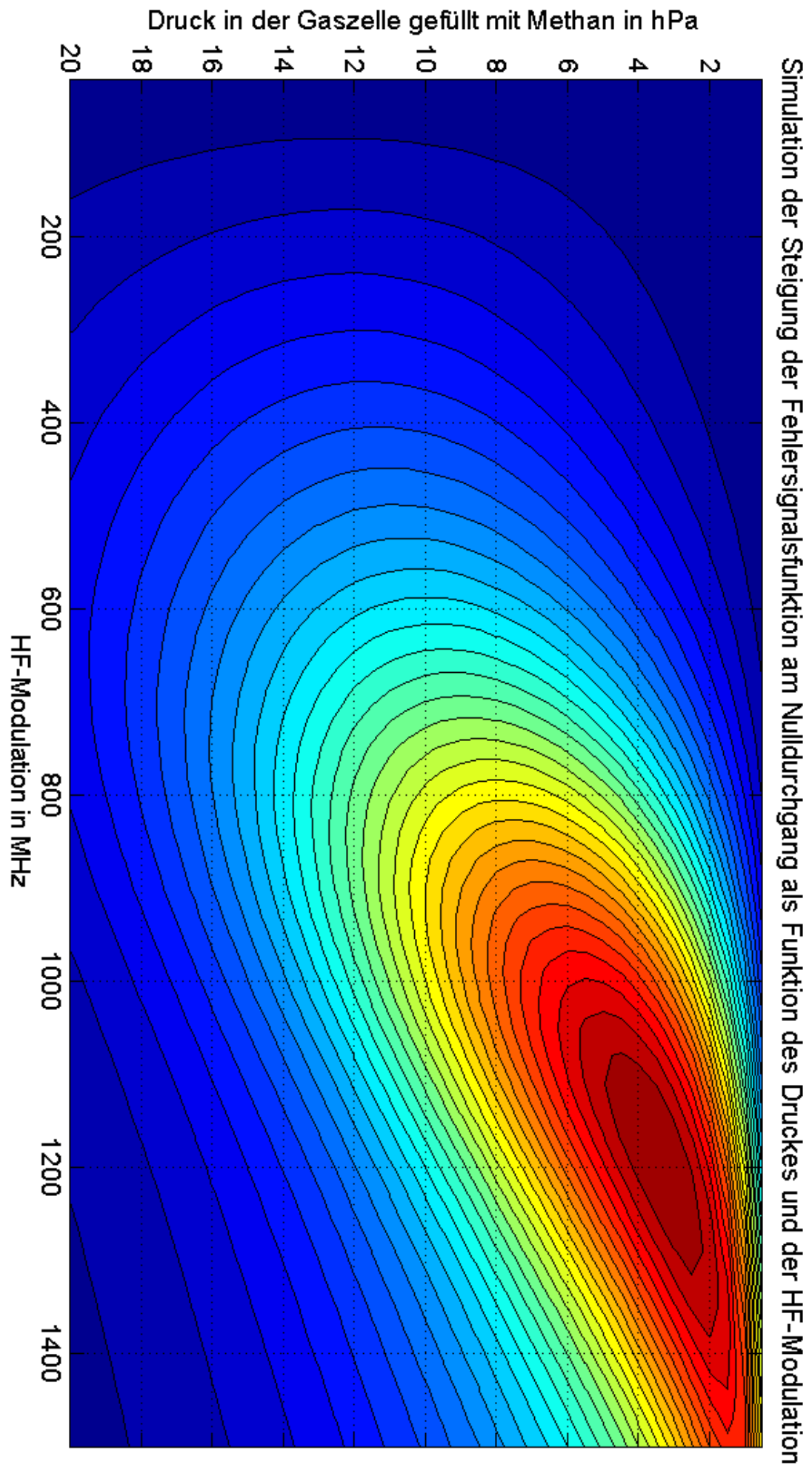


Abbildung 11: Simulation der Steigung am Nulldurchgang als Funktion des Druckes von reinem Methan in der 36m-Gaszelle und der HF-Modulation. Die Farben sind relativ zum Maximum bei ungefähr 3,5 hPa und 1200 MHz HF-Modulation.

Simulation der Steigung am Nulldurchgang als Funktion der HF-Modulation und des Druckes in der Gaszelle
im Bereich von 1 bis 5 hPa

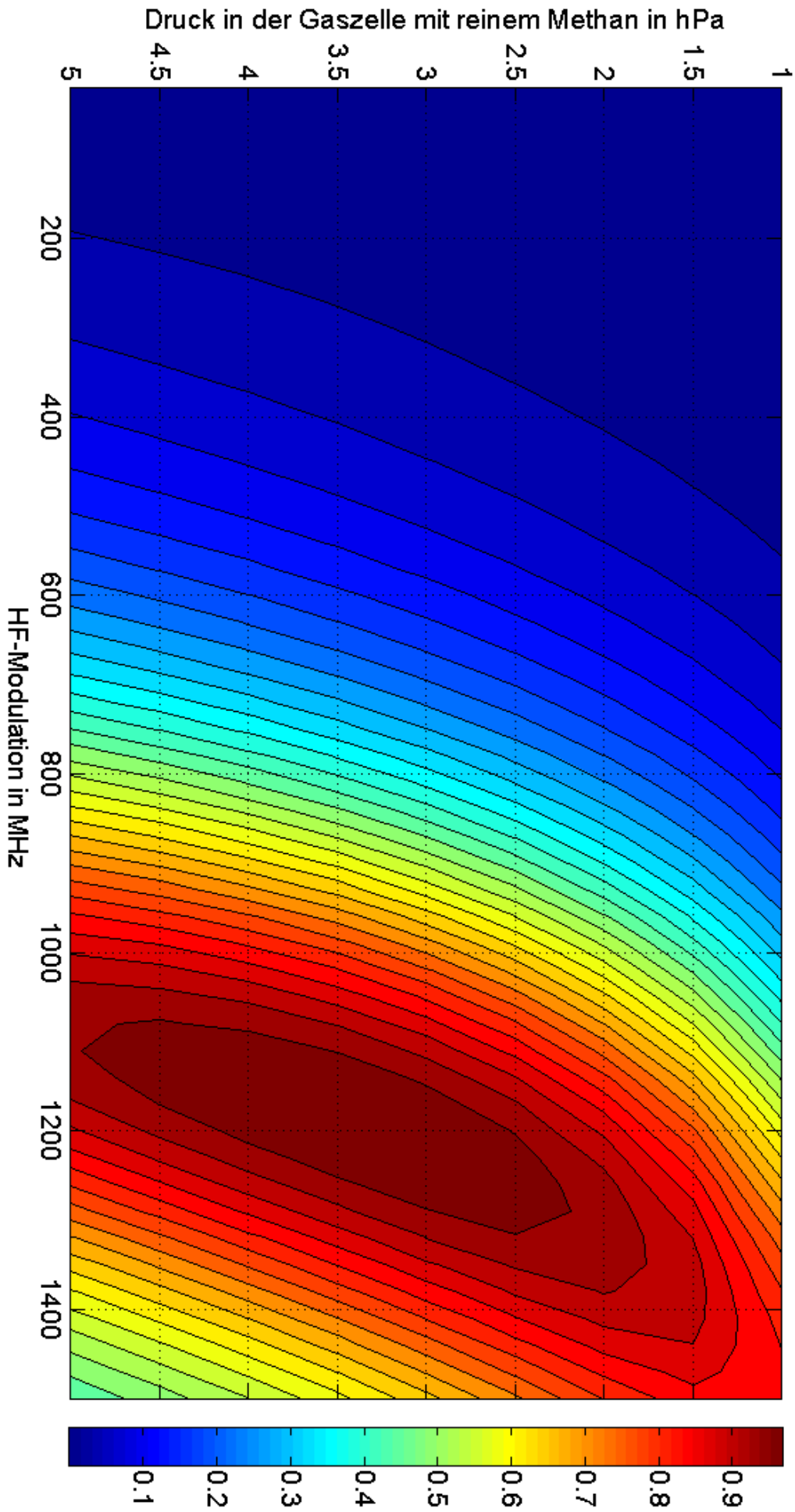


Abbildung 12: Ausschnitt aus Abbildung 11 für den Bereich von 1 bis 5 hPa.

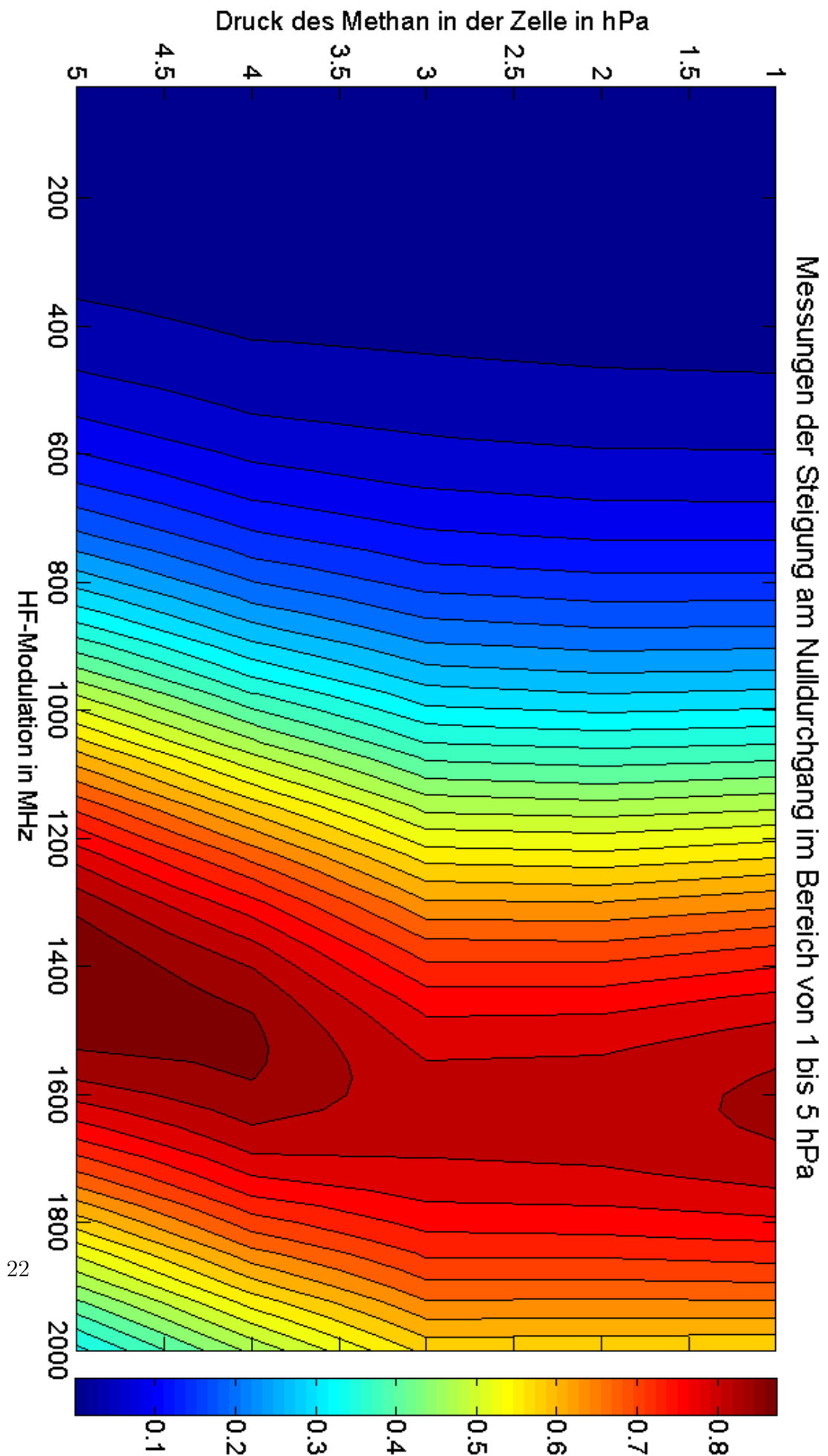


Abbildung 13: Messungen der Steigung am Nulldurchgang. Für diese Graphik erfolgte die Messungen mit verschiedenen HF-Modulationen bei gleichbleibenden Druck. Die Ergebnisse für den gleichen Druck wurden für die bessere Darstellung jeweils an eine Gaußkurve angepasst und somit fehlende Punkte errechnet.

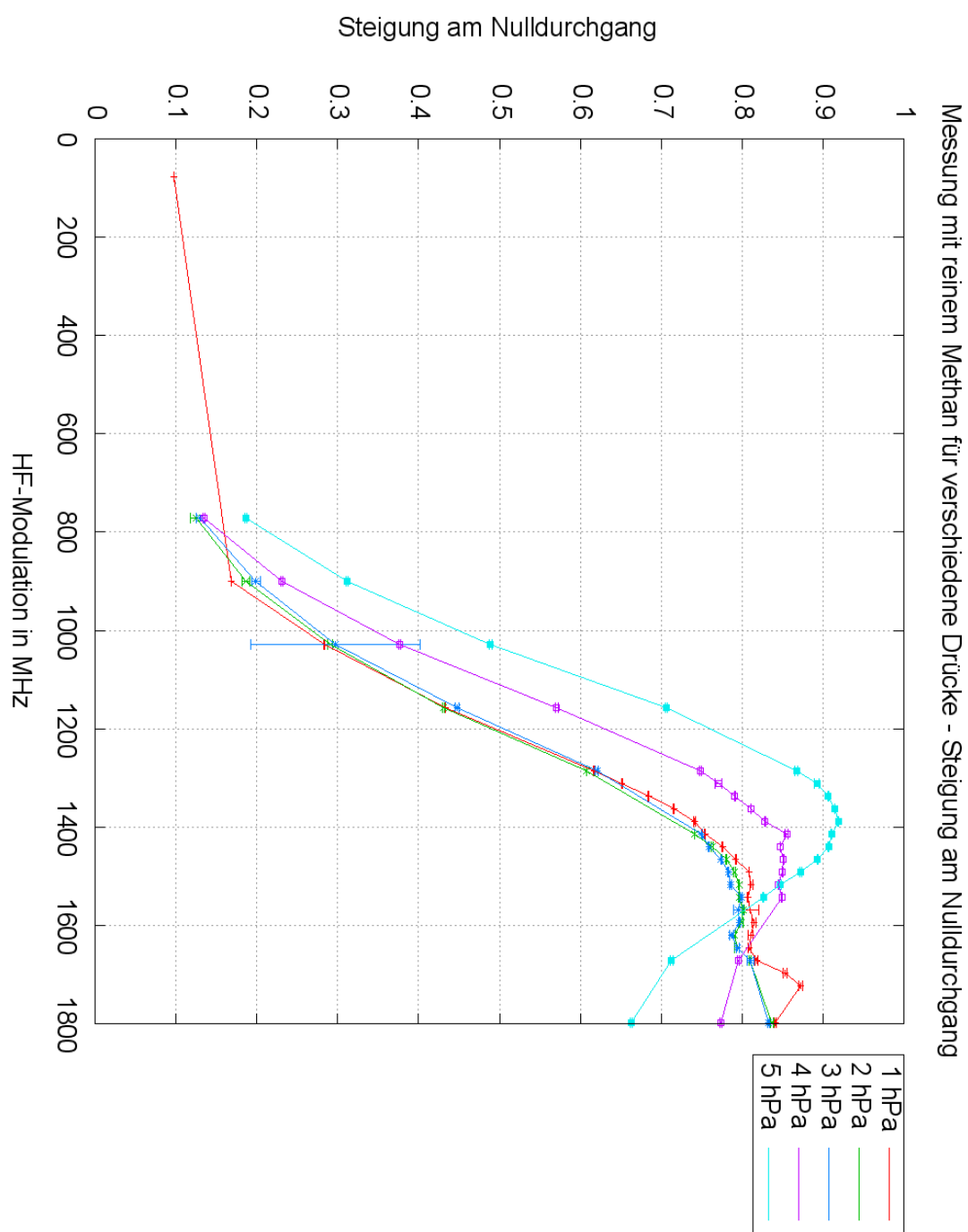


Abbildung 14: Einzelmessungen der Steigung am Nulldurchgang mit Fehlerbalken für Abbildung 13 vor der Anpassung an eine Gaußkurve.

Schwebungsfrequenz zwischen Mess- und Referenzdiode am Nulldurchgang in MHz

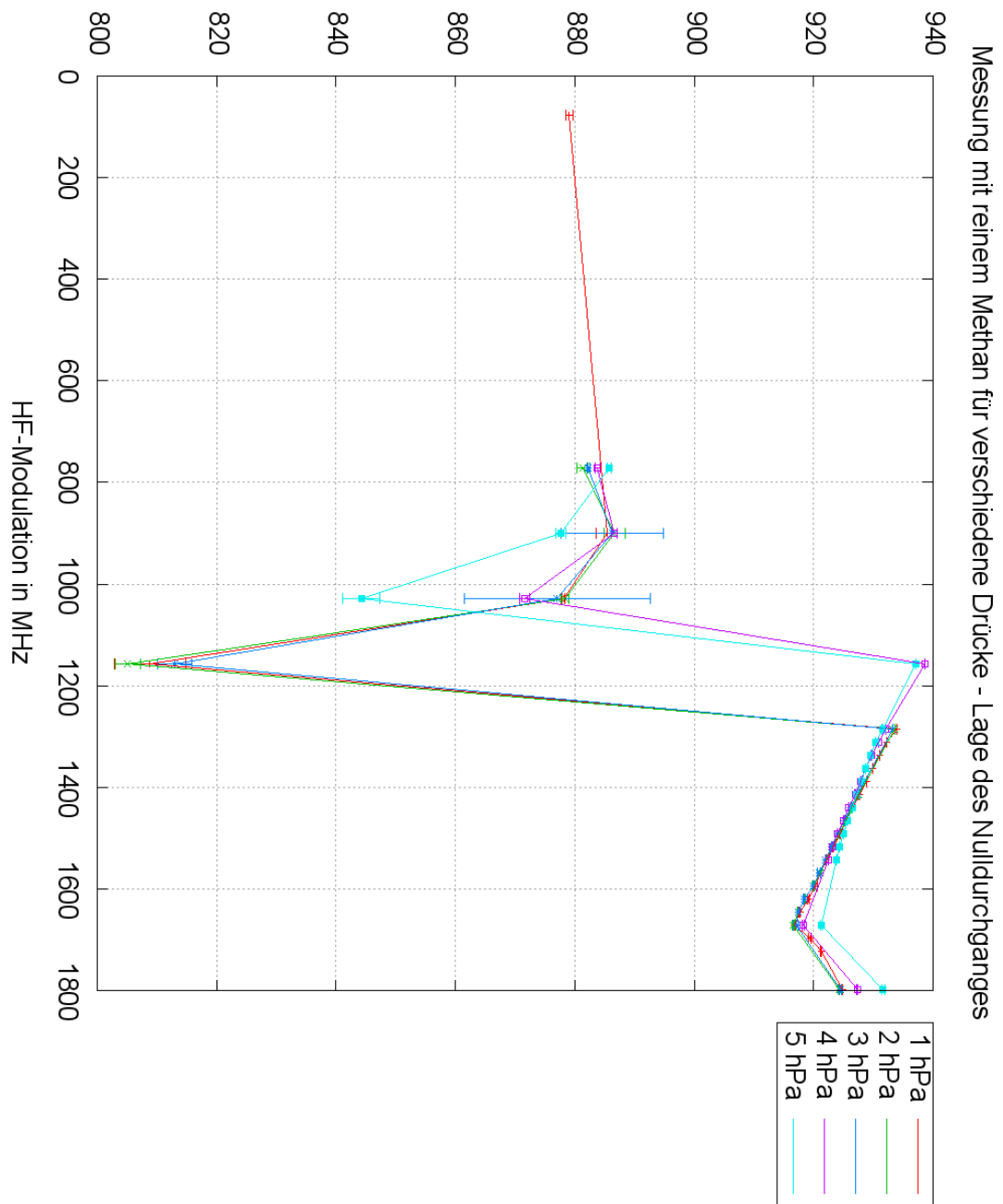


Abbildung 15: Einzelmessungen der Lage des Nulldurchganges.

6. Abschluss

Die von mir ausgeführten Messungen decken sich bis auf einige Details mit den Simulationen. Die festgestellten Unterschiede zeigen interessante Veränderungen und werden in weitergehende Überlegungen einfließen. Auch sind weitere Messungen mit höheren Drücken notwendig, um die Tendenz in einem größeren Rahmen zu bestätigen.

Für weiterführende Messungen sollte das in Abschnitt 3.1.3 besprochene Problem mit dem Drucksensor gelöst werden. Außerdem ist zu klären, wie es zu dem merkwürdigen Verhalten in den Messungen der Nulllage bei ca. 1200 MHz HF-Modulation kommt. Dies sind allerdings eher technische Verbesserungsvorschläge.

Der nächste interessante Schritt wird dann die Vermessung von Mischungen bestehend aus CO_2 und CH_4 sein. Aufgrund der geplanten Kompaktheit des späteren Messsystems wird in der Gaszelle für die Stabilisierung mehrerer Seedlaser eine Mischung aus CO_2 und CH_4 sein. Eine Druckverbreiterung der CH_4 -Absorptionslinie durch die CO_2 Moleküle lässt sich nur schlecht mit HITRAN simulieren, da die Parameter nur die Verbreiterung durch Luft beschreiben, also einer bestimmten Zusammensetzung der Luftbestandteile. Der Grund dafür ist, dass diese Datenbank für Rechnungen zu Messungen in der Atmosphäre vorgesehen ist und nicht für exotische Mischungen von Gasen in einer Multipasszelle. Die optimale Kombination aus Druck und Amplitude der HF-Modulation wird also leicht variieren gegenüber denen für reines Methan.

A. Weiterführende Überlegungen zur zusätzlichen Befüllung der Gaszelle mit CO_2

Überblick ursprünglicher Aufbau

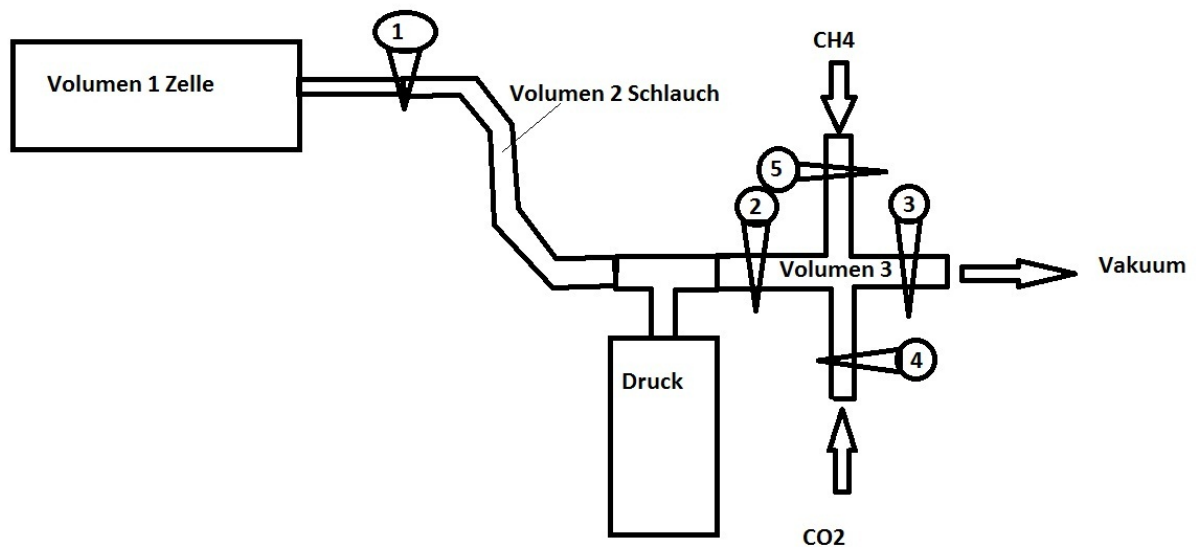


Abbildung 16: Geplanter Aufbau der Gaszelle. Ventil 2 wurde für die aktuellen Messungen nicht verbaut.

Die Abbildung 16 zeigt schematisch den ursprünglichen Aufbau an der Gaszelle mit angeschlossener Vakuumpumpe und CO_2 - und CH_4 - Zufuhr.

Die ursprüngliche Idee zur Befüllung und Messung an der Zelle war wie folgt:

- Alle fünf Ventile sind offen und es wird Vakuum erzeugt.
- Ventile 5 und 3 werden geschlossen und eine bestimmte Menge CO_2 wird eingeleitet.

- Ventile 4 und 3 werden geschlossen und es wird langsam mithilfe eines fein regelbaren Ventils 5 CH_4 zugeführt. Dadurch verändert sich das Verhältnis von CO_2 und CH_4 langsam.
- Währenddessen werden Messungen in der Gaszelle vorgenommen und der aktuelle Druck in dem System wird gemessen. Dadurch kann jede Messung einem Verhältnis von CO_2 zu CH_4 zugeordnet werden.

Mit diesem Aufbau kann jedoch nicht garantiert werden, dass kein CO_2 dem System über Ventil 5 entweicht. Ziel der Anordnung war es, möglichst selten die Zelle evakuieren zu müssen und somit Material und Zeit zu sparen.

Alternative Methode

Die Abnahme des CO_2 wird in Kauf genommen und muss in die Berechnungen für das Verhältnis der Gase einfließen. Es wird daher folgendes Vorgehen vorgeschlagen:

- Alle Ventile öffnen und das komplette System evakuieren.
- Ventile 5 und 3 schließen und gewünschte Menge CO_2 einleiten.
- Ventil 1 schließen, alle anderen Ventile öffnen, und noch einmal evakuieren.
- Ventile 3 und 4 schließen, 2 und 5 öffnen und gewünschte Menge CH_4 zuführen.
- Ventil 2 schließen und Ventil 1 öffnen. Die Gase vermischen sich nun. Eine vollständige Durchmischung sollte 3-5 Minuten dauern.

Soll nun der Methananteil erhöht werden, geht man wie folgt vor:

- Ventil 1 schließen und evakuieren.
- Ventile 3 und 4 schließen und Methan einleiten.
- Ventil 2 schließen und Ventil 1 öffnen. Eine vollständige Durchmischung sollte wieder 3-5 Minuten dauern.

Theoretische Überlegungen zur Bestimmung des Verhältnisses von CO_2 und CH_4

Die Bestimmung der Gasmengen erfolgt über die Druckmessung zwischen Ventil 1 und 2. Bei Zimmertemperatur befinden sich beide Gase weit über ihrem Siedepunkt und da in dem System tendenziell Unterdruck herrscht, kann von idealen Gasen ausgegangen werden.

$$pV = NkT \rightarrow p_{\text{CO}_2} = N_{\text{CO}_2} \frac{kT}{V_1 + V_2 + V_3}. \quad (5)$$

Hier ist k die Boltzmann-Konstante für ideale Gase und T die Temperatur, die als konstant angenommen werden kann. N_{CO_2} ist die Menge an CO_2 in dem Gesamtvolumen aus V_1 , V_2 und V_3 . Bei einer Gleichverteilung des Gases im ganzen System gilt folgendes Verhältnis für den Anteil an CO_2 in der Gaszelle:

$$\frac{N_{\text{Cell-}\text{CO}_2}}{N_{\text{CO}_2}} = \frac{V_1}{V_1 + V_2 + V_3}. \quad (6)$$

Die Menge an CO_2 in der Zelle ist somit über den Druck bestimmt. Die Menge an Methan ist ähnlich zu bestimmen, jedoch wird jetzt das Gas vorerst nur in V_2 und V_3 eingeleitet. Daher gilt hier das Ideale-Gas-Gesetz wie folgt:

$$p_{\text{CH}_4} = N_{\text{CH}_4} \frac{kT}{V_2 + V_3}. \quad (7)$$

Auch hier bezeichnet N_{CH_4} die Menge an Methan, die im gesamten System vorliegt. Der Anteil, der zum Verhältnis in der Zelle beiträgt, berechnet sich aus folgendem Verhältnis analog zu Gleichung 6:

$$\frac{N_{\text{Cell-}\text{CH}_4}}{N_{\text{CH}_4}} = \frac{V_2}{V_3 + V_2}. \quad (8)$$

Für das Verhältnis von CO_2 und CH_4 in der Zelle, also in den Volumina V_1 und V_2 gilt somit:

$$\frac{N_{\text{Cell-}\text{CO}_2}}{N_{\text{Cell-}\text{CH}_4}} = \frac{N_{\text{CO}_2} V_1}{(V_1 + V_2 + V_3)} \frac{(V_3 + V_2)}{V_2 N_{\text{CH}_4}} = \frac{N_{\text{CO}_2}}{N_{\text{CH}_4}} \frac{V_1}{V_2} \frac{(V_2 + V_3)}{(V_1 + V_2 + V_3)} = \frac{p_{\text{CO}_2}}{p_{\text{CH}_4}} \frac{V_1}{V_2}. \quad (9)$$

Wird nachträglich Methan hinzugefügt, muss beachtet werden, dass ein Teil des CO_2 und CH_4 beim erneuten Evakuieren verloren geht. Bei einer Gleichverteilung der Gase in den Volumina V_1 und V_2 bleibt das Verhältnis der Gase zueinander gleich. Da die absolute Menge von Methan und Kohlendioxid bekannt ist, kann das neue gewünschte Verhältnis und die dafür benötigte Menge an neuem Methan

berechnet werden.

Die Anzahl an Molekülen verringert sich beim Abpumpen wie folgt:

$$\frac{N_{new}}{N_{old}} = \frac{V_1}{V_1 + V_2}. \quad (10)$$

Für das neue Verhältnis gilt dann:

$$\frac{N_{CO_2-Cell}}{N_{CH_4-Cell}} = \frac{N_{CO_2-Cell-new}}{N_{CH_4-Cell-new} + N_{CH_4-add}}. \quad (11)$$

Für den benötigten Druck gilt analog zu Gleichung 7:

$$p_{CH_4-add} = \frac{kTN_{CH_4-add}}{V_2}. \quad (12)$$

Für genauere Berechnungen müssen also zuerst die Volumina der Gaszelle und des Schlauches zwischen Ventil 1 und 2 berechnet werden. Hierbei sollte für eine mögliche Fehlerrechnung die Volumenänderung des Schlauches betrachtet werden, die entsteht, wenn die Pumpe verschoben wird.

Bestimmung des Verhältnisses der Volumina

Der aktuelle Aufbau entspricht dem aus Abbildung 16 ohne dem Ventil 2 (Siehe Abbildung 5). Die Volumina V_2 und V_3 sind also ein großes Volumen, in den folgenden Rechnungen V_2 genannt. Auf die vorherigen Überlegungen hat diese Vereinfachung im Aufbau keinen Einfluss, da diese beiden Volumina entweder in der Summe auftraten, oder eine Vergrößerung des alten Volumens V_2 experimentell keinen Einfluss hat. Das benötigte Verhältnis der Volumina V_1 und V_2 kann jetzt wie folgt bestimmt werden:

- Das komplette System wird über ein Ventil an der Vakuumpumpe auf Normaldruck ausgeglichen. Dieser wird am Drucksensor abgelesen und notiert.
- Ventil 1 wird geschlossen und es wird Vakuum erzeugt.
- Ventile 3,4,5 werden geschlossen, dann wird Ventil 1 geöffnet.
- Bei dem kompletten Vorgang darf die Pumpe nicht verschoben werden, um Änderungen des Volumens im Schlauch durch Verformungen zu vermeiden.

Wieder kann mithilfe des Idealen-Gas-Gesetzes gerechnet werden:

$$p_{normal}V_1 = p_{new}(V_1 + V_2). \quad (13)$$

Dabei wird davon ausgegangen, dass das Öffnen des Ventil 1 einer isothermen Expansion entspricht und die Teilchenanzahl in V_2 im Vergleich zu der Teilchenanzahl in V_1 so gering ist, sodass bei diesem Vorgang von konstanter Teilchenanzahl ausgegangen werden kann.

$$\frac{p_{normal}}{p_{new}} = \frac{V_1 + V_2}{V_1} = 1 + \frac{V_2}{V_1} \quad (14)$$

Eine kurze Umformung zeigt, dass das Verhältnis von Normaldruck und dem Druck, der nach der Expansion am Drucksensor abgelesen wird, der Summe aus 1 und dem Verhältnis des Volumen V_2 zu V_1 entspricht. Da in allen vorherigen Rechnungen nur das Verhältnis der Volumina benötigt wird, reicht dies aus, um alle Überlegungen zu verschiedenen Mischungen durchzurechnen.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die diese Arbeit ermöglicht haben.

Ich danke Dr. Randolph Pohl und Mathieu Quatrevalet für ihre kompetente
Betreuung.

Ich danke Prof. Dr. Theodor W. Hänsch, Dr. Gerhard Ehret und Dr. Dieter
Hausamann für ihre Vermittlung und dafür, dass sie mir die Möglichkeit gaben,
diese Arbeit zu verfassen.

Ich danke der Lidar-Abteilung des Instituts für Physik der Atmosphäre für die
kollegiale Umgebung und schnelle Hilfe bei allerlei Fragen.

Ich danke meinen Eltern für ihre Unterstützung und den Korrekturlesern
Max Mehlhorn, Robin Schlenga und Sandra Sagmeister

B. Literatur- und Abbildungsverzeichnis

Literatur

- [1] *MERLIN: Deutsch-französischer Klimasatellit startet 2014*. Website des DLR. http://www.dlr.de/pa/desktopdefault.aspx/tabid-2342/6725_read-26662/. Version: September 2010
- [2] *Methan*. Bildungswiki "Klimawandel" des Hamburger Bildungsserver. <http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Methan>. Version: 30. Juni 2011
- [3] AMEDIEK, Axel: *Messung von CO₂-Säulengehalten in der Atmosphäre mit Lidar-Methoden*, Ludwig-Maximilians-Universität, Diss., 2007. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bvb:19-71485>
- [4] BAUMGARTNER, Richard A.; BYER, Robert L.: *Continuously tunable ir lidar with applications to remote measurements of SO₂ and CH₄*. In: *Applied Optics* 17 (1978), S. 3555–3561. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.17.003555>. – DOI 10.1364/AO.17.003555
- [5] DEVARA, P. C. S.: *Remote sensing of atmospheric aerosols from active and passive optical techniques*. In: *Int. J. Remote Sensing* 19 (1998), S. 3271–3288. <http://dx.doi.org/10.1080/014311698213966>. – DOI 10.1080/014311698213966
- [6] FIX, Andreas; EHRET, Gerhard; HOFFSTÄDT, Andreas; KLINGENBERG, Hans H.; LEMMERZ, Christian; MAHNKE, Peter; ULBRICHT, Matthias; WIRTH, Martin; WITTIG, Reinhard ; ZIRNIG, Werner: *CHARM - A Helicopter-borne Lidar System for pipeline Monitoring*. In: *22nd International Laser Radar Conference (ILRC 2004)*, 07-12-2004 - 07-16-2004. – Matera, (I)
- [7] FRANKENBERG, C.; WARNEKE, T.; BUTZ, A.; ABEN, I.; HASE, F.; SPIETZ, P. ; BROWN, L. R.: *Pressure broadening in the 2ν₃ band of methane and its implication on atmospheric retrievals*. In: *Atmospheric Chemistry and Physics* 8 (2008), S. 5061–5075. <http://dx.doi.org/10.5194/acp-8-5061-2008>. – DOI 10.5194/acp-8-5061-2008
- [8] KIEMLE, C.; QUATREVALET, M.; EHRET, G.; AMEDIEK, A.; FIX, A. ; WIRTH, M.: *Sensitivity studies for a space-based methane lidar mission*. In: *Atmospheric Measurement Techniques Discussions* 4 (2011), Nr. 3, 3545–3592.

- <http://dx.doi.org/10.5194/amtd-4-3545-2011>. – DOI 10.5194/amtd-4-3545-2011
- [9] LASHOF, Daniel A.; AHUJA, Dilip R.: *Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming*. In: *Letters to Nature* 344 (1990), S. 529–531. <http://dx.doi.org/10.1038/344529a0>. – DOI 10.1038/344529a0
 - [10] MENLO SYSTEMS GMBH (Hrsg.): *User Manual - FC1500 Optical Frequency Synthesizer*. Version 1.1. Am Klopferspitz 19, 82152 Martinsried: Menlo Systems GmbH, Mai 2009. – Gültig für: SN: FC1500/069
 - [11] PACHAURI, Rajendra K.; REISINGER, Andy ; CORE WRITING TEAM ; IPCC (Hrsg.): *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, 2007 http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/en/contents.html
 - [12] PRASAD, Narasimha S.; GEIGER, Allen R.: *Remote sensing of propane and methane by means of a differential absorption lidar by topographic reflection*. In: *Opt. Eng.* 35 (1996), S. 1105–1111. <http://dx.doi.org/10.1117/1.600599>. – DOI 10.1117/1.600599
 - [13] QUATREVALET, Mathieu; AMEDIEK, Axel; FIX, Andreas; KIEMLE, Christoph; WIRTH, Martin; BÜDENBENDER, Christian; SCHWEYER, Sebastian; EHRET, Gerhard; HOFFMANN, Dieter; MEISSNER, Ansgar; LÖHRING, Jens ; LUTTMANN, Jörg: *CHARM-F: The airborne integral path differential absorption Lidar for simultaneous measurements of atmospheric CO₂ and CH₄*
 - [14] WEITKAMP, Claus (Hrsg.): *Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere (Springer Series in Optical Sciences)*. 1. Springer, 2005. – ISBN 978-0387400754

Abbildungsverzeichnis

1.	Schema des gepulsten Lidar-Prinzips, entnommen aus [3]	2
2.	Schema des DIAL-Verfahren, entnommen aus [3]	3
3.	Schema des IPDA-Verfahren, entnommen aus [3]	3
4.	Methanspektrum im Bereich von 60077 cm^{-1} , entnommen aus [7] .	5
5.	schematischer Übersicht über die Gaszelle und ihre Anschlüsse . . .	7
6.	Phasenverschiebung beim Frequenzkamm, entnommen aus [10] . . .	8
7.	Das Prinzip eines optischen Frequenzgenerators, entnommen aus [10]	9
8.	Darstellung zu starker Modulation und Unsymmetrie des Troges . . .	13
9.	Beispiel Messzyklus mit allen Datenpunkten	15
10.	Beispiel Einzelmessung mit guter Anpassung	16
11.	Simulation der Steigung am Nulldurchgang	20
12.	Ausschnitt aus Abb. 11	21
13.	Messungen der Steigung vergleichbar zu Abb. 12	22
14.	Einzelmessungen für Abb. 13	23
15.	Einzelmessungen der Lage des Nulldurchganges	24
16.	Geplanter Aufbau der Gaszelle	26

Erklärung zur Eigenständigkeit

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst habe und keine anderen als die angegebenen Quellen verwendet habe.

München, den 22. Juli 2011

Sebastian Lehrack